4Н

УДК 004.93'1;004.932

А.М. Недзьведь, С.В. Абламейко, О.В. Недзьведь
Объединенный институт проблем информатики НАН РБ, г. Минск
nedzveda@tut.by

Анализ свойств наноповерхностей по АСМ изображениям

В данной статье представлена схема алгоритма анализа наноповерхности по изображениям атомно-силовой микроскопии. В основе анализа лежит коррекция неравномерного контраста и выделение объектов с округлой формой. Данный алгоритм позволил определить не только классические характеристики описания наноповерхности, такие как шероховатость, но и дополнительные характеристики нанообъектов, позволяющие получить как их индивидуальное, так и групповое описание.

Введение

Атомно-силовая микроскопия позволяет получать достоверную информацию о топографии рельефа объекта [1]. При исследовании характеристик нанообъектов рассматриваются не только отдельные атомы или молекулы, но и их достаточно крупные макрообъединения.

Для дальнейшей обработки таких изображений необходимо выделение объектов и их характеристик. Эта задача является довольно сложной, так как наноизображения имеют много особенностей. Ранее выполнялись попытки обработки подобных изображений [2-5], однако в данном случае каждый конкретный случай требует отдельного рассмотрения, так нами ранее обсуждалась обработка магнито-оптических изображений [6], [7]. В данной статье производится дальнейший анализ магнито-оптических изображений на примере изображений нанообъектов.

В данной работе рассматривается использование универсальных программных пакетов инженерного анализа – CAE-систем при подготовке данных для проведения численных экспериментов по определению характеристик контактного взаимодействия нанообразцов и приводятся результаты вычислительных экспериментов по определению характеристик контактного взаимодействия нанообразцов. В работе приводятся результаты вычислительных экспериментов по определению характеристик их контактного взаимодействия средствами пакета LS-DYNA.

Особенности наноповерхности изображения

В поставленной задаче определения шероховатости объекты представлены полусферами. На полутоновых наноскопических изображениях они представлены округлыми регионами с увеличивающейся яркостью к центру (рис. 1).

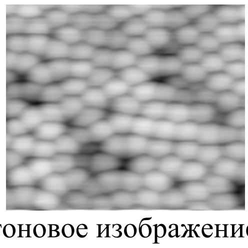


Рисунок 1 – Полутоновое изображение наноповерхности со сферическими объектами

Исходными данными являются полутоновые изображения, имеющие ряд дефектов.

Горизонтальный профиль яркости исходного изображения представлен гладкой линией (рис. 2).

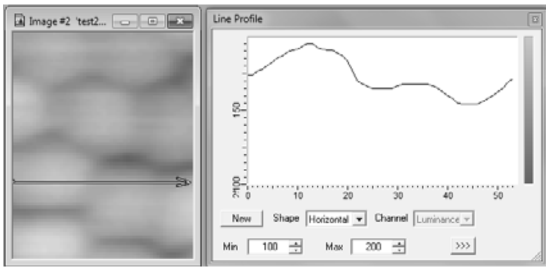


Рисунок 2 – Горизонтальный профиль яркости наноскопической поверхности по горизонтали

По вертикали он имеет профиль с большим контрастом и небольшими выбросами (рис. 3).

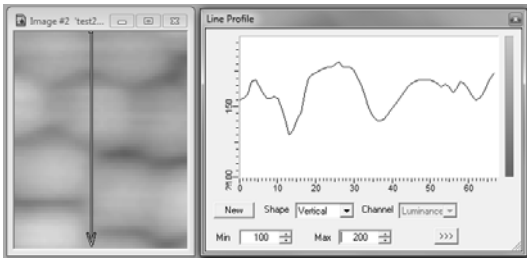


Рисунок 3 – Вертикальный профиль яркости

В результате на изображении присутствует неоднородный геометрический контраст, где составляющая изменений по вертикали значительно превышает составляющую по горизонтали. Этот эффект связан с условиями формирования изображения. Процесс построения изображения основан на сканировании поверхности кантилевером. В общем случае это позволяет получить трёхмерное топографическое изображение поверхности с высоким разрешением, которое представлено в виде полутонового изображения. Сканирование выполняется по линиям. В результате, время, затраченное на получение соседних пикселей по вертикали, значительно превышает время получения пикселей по горизонтали. За это время на результат «успевает» повлиять целый ряд внешних помех: геометриический дрейф – поверхность смещается и сканирование выполняется не по соседней области, дрейф яркости – механический способ движения иглы чувствителен к любым колебаниям в окружающем пространстве. Кроме того, при горизонтальном сканировании для кантилевера свойственна некоторая инерционность. Это приводит к тому, что свойства яркости каждой линии получают уникальные свойства. Такая неоднородность отражается на глобальной гистограмме яркости (рис. 4). Гистограмма наноповерхности, несмотря на гауссоподобную форму, имеет много отдельных импульсов, которые резко отличаются от своих соседей. Все эти дефекты влияют на качество обработки изображения и требуют их удаления или компенсации.

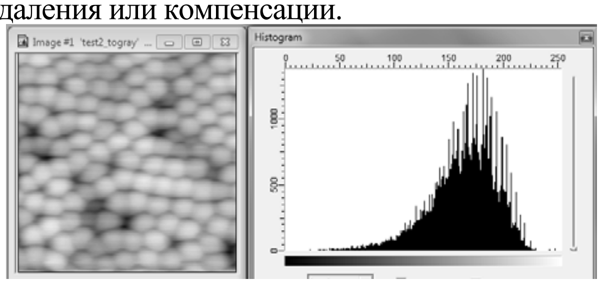


Рисунок 4 – Гистограмма изображения наноповерхности

Коррекция локальной неоднородности контраста

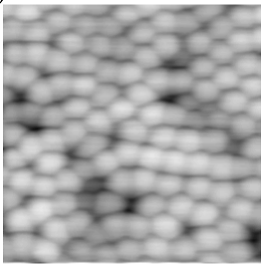
Геометрическая неоднородность контраста на изображениях, получаемых методами атомно-силовой микроскопии, является серьезной проблемой, решение которой в общем случае до сих пор не найдено. В данной работе мы предлагаем два подхода: первый заключается в генерации возможного фона для изображения, второй основан на вычислении характеристик локального контраста для вертикальных и горизонтальных линий. Оба подхода основываются на предположении о симметричности объектов на наноповерхности.

В первом способе генерируется два фоновых образа. Один создается многократным применением простой усредняющей свертки с большим растром (для изображения 256 × 256 – растр 14 × 14):

$$I_{xy} = \frac{1}{2 \cdot n} \sum_{i=y-n}^{y+n} \sum_{j=x-n}^{x+n} I_{ij},$$

где I_{xy} – значение пикселя на изображении с координатами x, y, n – полуразмер растра свертки.

В результате такого преобразования получается изображение, соответствующее темному фону (рис. 5 б).



а)



б)

Рисунок 5 – Изображение наноповерхности (а) и сгенерированный для него темный фон (б)

Второй фоновый образ соответствует максимальному уровню, т.е. «засветке изображения».

Данное изображение генерируется несколькими итерациями полутоновой дилатации (для изображения 256 × 256 – 2 итерации округлым растром 5 × 5). Дилатация множества A по множеству B (или относительно B) определяется как

$$A \oplus B = \left\{ z \mid (\hat{B})_Z \bigcap A \neq \varnothing \right\}.$$

В основе этого соотношения лежит операция получения центрального отражения множества B относительно его начала координат (которое для краткости будем называть центром B) и затем сдвиг полученного множества в точку z. При этом дилатация множества A по B – это множество всех таких смещений, при которых множества B и A совпадают. Для полутонового пикселя происходит смещение границ, т.е. текущему пикселю присваивается значение его соседей.

В результате получается изображение слившихся объектов (рис. 6).

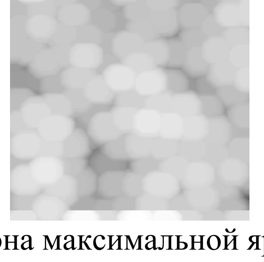
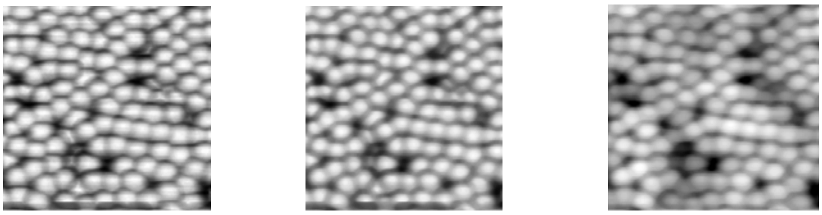


Рисунок 6 – Изображение фона максимальной яркости для наноповерхности

Имея два предела для изображения по яркости, можно приблизительно определить локальный контраст каждой точки. Он приблизительно будет равен разнице между ними. На основе этих данных можно определить значения изменения контраста в каждой точке, но данная операция не является эффективной. Основываясь на наличии двух фоновых изображений, можно выполнить операцию коррекции фона, которая заодно компенсирует недостатки пространственной неоднородности контраста:

$$C_{x,y} = \frac{(I_{x,y} - B_{x,y}) \cdot (W_{\max} - B_{x,y})}{(W_{x,y} - B_{x,y})},$$

где $I_{x,y}$ – значение яркости пикселя изображения с магнитооптической компонентой; $B_{x,y}$ – значение пикселя для изображения с постоянной компонентой; $W_{x,y}$ – значение пикселя для изображения при полном насыщении (засветке); W_{max} – максимальное значение яркости изображения при насыщении яркости; $C_{x,y}$ – новое значение яркости пикселя в скорректированном изображении (рис. 7а).



а) б) в)

Рисунок 7 – Изображение наноповерхности после коррекции фона (а), после дополнительной медианной фильтрации (б) и после локальной коррекции контраста (в)

Однако на полученном изображении остались горизонтальные линии, и их контраст даже увеличился. Подобный недостаток компенсируется медианной фильтрацией, позволяющей сгладить поверхность изображения.

Второй способ заключается в вычислении локального контраста. Его суть состоит в определении числового значения локального контраста для каждой линии изображения, нелинейном его усилении и восстановлении той же линии изображения с измененной яркостью, что обеспечивает в сравнении с исходным изображением усиление локального контраста по линиям. Структурно процедура усиления локального контраста состоит из трех основных этапов и используется для каждого элемента *L(i,j)* с координатами *(i,j)* исходного изображения L.

На практике эффективность способа недостаточна для обработки изображений, которые содержат мелкие детали – зазоры между объектами. Причина заключается в том, что локальный контраст определяется по формуле, где его значение пропорционально мере отличия центрального элемента изображения от окружающего фона по значению яркости. Составными элементами этой формулы являются непосредственные значения элементов или их усредненные значения, что приводит к неполному описанию текстуры локальной области. Наиболее полно такие характеристики текстуры как однородность, «шершавость» и зернистость описываются статистическими методами.

Одним из наиболее простых методов описания текстуры является использование моментов гистограммы интенсивностей элементов изображения. Пусть L – случайная величина, которая определяет дискретную интенсивность изображения, $H(L(i,j))$ – соответствующие значения гистограммы. Известно, что n-й момент $L(i,j)$ относительно среднего значения определяется формулой

$$\mu_n(L) = \sum_{(i,j)\in W} (L(i,j)^2 H(L(i,j)),$$

где $\bar{L}$ – среднее значение яркостей элементов локальной окрестности W.

Из этого выражения следует, что $\mu_0 = 1$, а $\mu_1 = 0$. Второй момент соответствует дисперсии $\sigma^2(L)$ и служит для описания текстуры. Он является также мерой контраста интенсивности и применяется для описания однородности поверхностей. В результате в качестве меры контраста текстуры предложено использовать выражение

$$C(i,j) = 1 - \frac{1}{1 + k\sigma^2(L)},$$

где $\sigma^2(L)$ – дисперсия в окрестности $n \times m$, $k = 0{,}8$ – коэффициент нормирования. $C(i,j)$ равно нулю для окрестностей с постоянной интенсивностью и единице – для больших значений $\sigma^2(L)$, что полностью отвечает требованиям определения локального контраста.

Таким образом, в предложенном методе на его первом этапе для каждого элемента изображения необходимо вычислить локальный контраст как C(i,j). Далее осуществляется нелинейное преобразование локального контраста C(i,j), и затем восстанавливается изображение путем определения нового значения яркости пикселей линии $L^*(i,j)$, для чего используется выражение:

$$L^*(i,j) = L(i,j) + \left(\frac{C^*(i,j) * n * m}{1 - C^*(i,j)} - \sum_{\forall (i,j) \in W_2 - W_1} (\overline{L}(i,j) - L(i,j)^2) H(L(i,j)) \right)^{0,5}.$$

Описанная процедура повторяется для каждого элемента каждой горизонтальной линии изображения.

В предложенном алгоритме используется статистическое определение локальных контрастов, благодаря чему учитываются как однородность текстуры, так и ее «Шершавость» и зернистость (рис. 7 в).

Эксперименты показали, что результат, полученный вторым способом, является более качественным, в смысле своей четкости, однако первый способ работает в три раза быстрее.

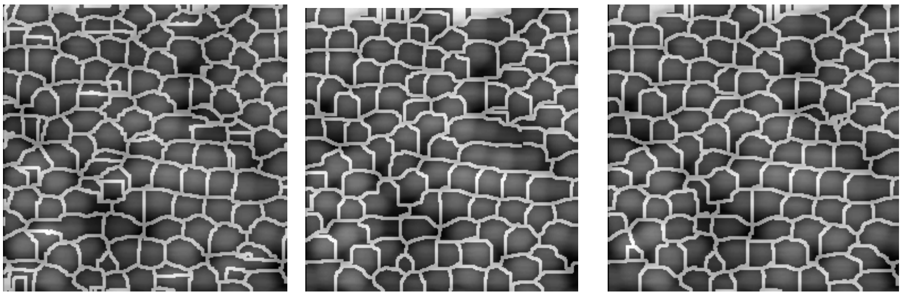
Сегментация сферических объектов на наноповерхности

Основой для определения характеристик поверхности (размера, формы, высоты и положения) являются образующие ее объекты. Для определения этих характеристик надо выделить соответствующие объекты на изображении.

Выделение объектов может осуществляться разными способами. Нами были разработаны два способа выделения объектов. Исходя из предположения о том, что объекты представлены сферами и пересекаются, их можно представить как топологическую поверхность. В этом случае можно определить положение впадин между ними.

Для определения ограничивающих линий между объектами существует алгоритм водораздела. Этот алгоритм является основным инструментом математической морфологии для сегментации изображений. Однако полученное изображение часто получается чрезмерно сегментированным на большое число маленьких областей (бассейнов), большинство из которых не является значимыми при решении проблемы.

В топографическом представлении изображения, численные значения (например, уровни серого) каждого пикселя выступают в качестве высоты этой точки. Преобразование водораздела вычисляет водосборные бассейны и линии хребтов. При этом в качестве водосборных бассейнов рассматриваются соответствующие области изображения, а линии хребтов являются границами этих областей. Основной проблемой данного алгоритма является чрезмерная сегментация, поскольку все границы и шумы отображаются в градиенте, что делает необходимым процесс удаления шума. В результате прямого применения этого алгоритма к изображению наноповерхности получаются дополнительные ложные объекты (рис. 8).



а) б) в)

Рисунок 8 – Результат работы алгоритма водораздела: а) примененный непосредственно к изображению наноповерхности, б) примененный к изображению наноповерхности после фильтрации шумов, в) примененный к изображению наноповерхности после коррекции локального контраста и фильтрации шумов

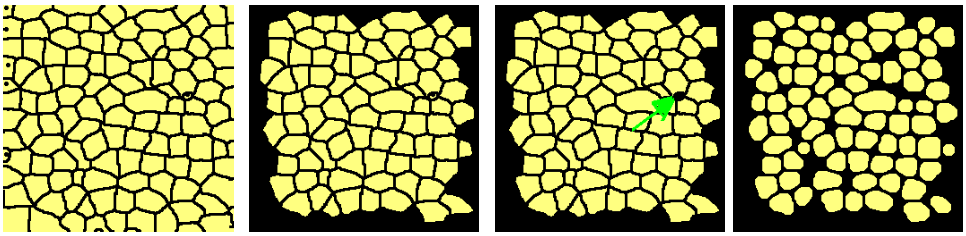
Улучшение результатов работы алгоритма водораздела заключается в сглаживании поверхности изображения. Для этого обычно применяются различные фильтры: линейный усредняющий, нелинейный медианный и морфологический. Однако в случае наноповерхности их применение перед преобразованием водораздела приводит к потере объектов на изображении, так как некоторые объекты сливаются вместе.

Такой результат получается из-за геометрической неоднородности контраста, о которой говорилось в предыдущей части. Применение коррекции контраста перед фильтрацией, удаляющей шумы, значительно улучшает результат (рис. 8 в).

Алгоритм позволяет получить границы объектов, но линии раздела получаются немного рубленые, так как преобразовании используются городские метрики вычисления расстояний.

Как говорилось выше, объекты на изображении представляют собой полусферы, однако изображение границ преимущественно состоит из многоугольников. Для решения этой проблемы разработан специальный алгоритм коррекции формы на основе математической морфологии.

Первым шагом алгоритма является инверсия границ (рис. 9 а).



а) б) в) г)

Рисунок 9 – Процесс бинарной обработки а) инвертированные границы объектов, б) результат удаления объектов прижатых к краю, в) удаление мелких объектов, г) коррекция формы объектов

Затем удаляются объекты, прижатые к краю (рис. 9 б).

На изображении присутствуют мелкие объекты, которые возникли на пустых участках. Они удаляются на основе фильтрации по площади (рис. 9 в).

Затем выполняется коррекция границ объектов с помощью операции морфологического отмыкания (рис. 9 г).

Данный алгоритм имеет ряд преимуществ по сравнению с первоначальным способом получения радиусов, так как позволяет вычислить ряд геометрических и яркостных характеристик, которые могут использоваться для более полного описания.

Вычисление характеристик объектов

Описание поверхности может быть расширено за счет использования обобщенных характеристик объектов. Используя такие характеристики можно определить как свойства индивидуальных объектов на поверхности материала, так и свойства всей поверхности.

Объекты определяются как области на изображении, соответствующие информативным структурам. Для извлечения полной информации об объектах изображения и использования ее для постановки диагноза необходимо вычислить характеристики (параметры) объектов изображения. На их основе делаются выводы о типе объекта или о качестве содержимого изображения. В зависимости от объектов определяют способ его описания и его характеристики. Основная классификация объектов определяется по их размерности. В области анализа изображений наиболее распространены три размерности, однако в частных случаях может использоваться и больше. В зависимости от размерности определяются классы характеристик, которые описывают объект.

Работа с трёхмерными объектами подразумевает три непременных этапа: построение изображения (визуализация), получение описательных характеристик, хранение информации об изображении. При этом первых два этапа в значительной степени взаимозависимы. Процесс визуализации во многом связан с предварительным анализом основных характеристик объекта. Процесс визуализации и форматы сохранения полученных данных были подробно описаны на предыдущем этапе выполнения задания. Сейчас наша задача состоит в описании параметров, характеризующих объёмные особенности поверхности микроструктур, а также методов, использованных для получения этих характеристик.

Выводы

В данной статье представлена схема алгоритма анализа наноповерхности по изображениям атомно-силовой микроскопии. В основе анализа лежит коррекция неравномерного контраста и выделение объектов с округлой формой. Данный алгоритм позволил определить не только классические характеристики описания наноповерхности, такие как шероховатость, он и дополнительные характеристики нанообъектов, позволяющие получить как их индивидуальное, так и групповое описание. Данный алгоритм реализован в программном комплексе TIP (рис. 10). Результаты вычислительных экспериментов для определения характеристик контактного взаимодействия были проведены на основе анализа реальных изображений металлов и керамики. Полученные результаты покАзывают, как на изображениях наноповерхности для объектов можно вычислить ряд характеристик и особенностей даже в таких сложных изображениях, как изображения наноструктур. Дополнительные характеристики позволили описать новые физические свойства наноповерхности без дополнительных дорогостоящих испытаний.

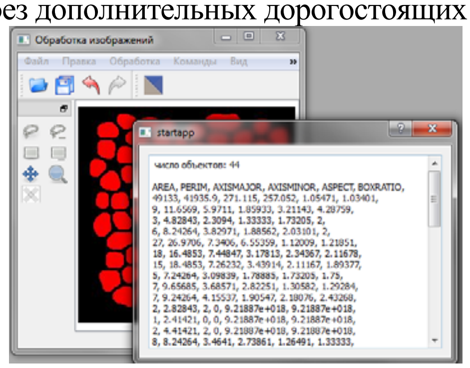


Рисунок 10 – Копия экрана программы TIP для анализа наноповерхности

Работа частично сопровождалась проектами МНТЦ B-1682 и B-1636.

Литература

1. Sellmyer D. Advanced Magnetic Nanostructures / D. Sellmyer and R. Skomski. – Springer, 2006.
2. Szmaja W. Digital Image Processing System for Magnetic Domain Observation in SEM / Szmaja W. // J. Magnetism Magnetic Mater. – 189(3), 353 (1998).
3. Yukio M. Automatic Visual Inspection System for Thin Film Magnetic Head Wafer Using Optical Enhancement and Image Processing Technique / M. Yukio, I. Hisafumi, and K. Hitoshi // Proc. SPIE Applications of Digital Image Processing XV / Ed. by A.G. Tescher // SPIE Homepage. – 1771, 20 (1993).
4. Feature Extraction for Magnetic Domain Images of Magneto-Optical Recording Films Using Gradient Feature Segmentation / [Q. Zhu, X. Wang, X. Zou, et al.] // J. Magnetism Magnetic Mater. – 248(2), 292 (2002).
5. Wang L. Trace Analysis for Magnetic Domain Images of L10 Polywinted Structures / L. Wang, Z. Fan, and D.E. Laughlin // Scripta Materiala. – 47(11), 781 (2002).
6. Image Correction in Magneto-Optical Microscopy / P. Paturi, LarsenB. Hvolbaek, B. Jacobsen, and N. Andersen // Rev. Sci. Instr. – 74(6), 2999 (1990).
7. Processing of Needkes-Like Images of Magnetic Domain Structures in Ultrathin Cobalt Wedge / A. Nedzved, S. Ablameyko, M. Tekielak [et al.] // 8th International Conf. on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2005), (May 18 – 20, 2005, Belarus, Minsk). – 2005. – P. 108-111.
8. Analysis of nanostructures by magneto-optical images / Nedzved A., Dobrogowski W., Ablameyko S. [et al.] // Pattern Recognition and Image Analysis. – Vol. 19, № 2. – 2009. – P. 321-333.

Literatura

1. Sellmyer D. Advanced Magnetic Nanostructures. Springer. 2006
2. Szmaja W. Magnetism Magnetic Mater. № 189(3), 353. 1998
3. Yukio M. Proc. SPIE Applications of Digital Image Processing XV. Ed. by A. G. Tescher (SPIE Homepage). №1771, 20. 1993.
4. Zhu Q. Magnetism Magnetic Mater. № 248(2), 292. 2002.
5. Wang L. Scripta Materiala 47(11), 781. 2002.
6. Paturi P. Rev. Sci. Instr. 74(6), 2999. 1990.
7. A. Nedzved. Processing of Needkes-Like Images of Magnetic Domain Structures in Ultrathin Cobalt Wedge, 8th International Conf. on Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2005). May 18–20, 2005. Belarus. Minsk. 2005. P. 108-111.
8. Nedzved A. Pattern Recognition and Image Analysis. Vol. 19. № 2. 2009. P. 321-333.

А.М. Недзьведь, С.В. Абламейко, О.В.Недзьведь

Аналіз властивостей наноповерхностей за АСМ зображенням

У даній статті представлена схема алгоритму аналізу наноповерхності за зображеннями атомно-силової мікроскопії. В основі аналізу лежить корекція нерівномірного контрасту і виділення об'єктів з округлою формою. Даний алгоритм дозволив визначити не тільки класичні характеристики опису наноповерхності, такі як шорсткість, але і додаткові характеристики нанооб'єктів, що дозволяють отримати як їх індивідуальний, так і груповий опис.

A.M. Nedzved, S.V. Ablameyko, O.V. Nedzved

Analysis of Nano-Surface Features by AFM Image Processing

In this paper the scheme of algorithm of nano-surface image analysis of atomic force microscopy was described. The analysis is based on correction of uneven contrast and object selection with a rounded shape. This algorithm allowed us to determine not only the classical characteristics of nano-surface such as roughness, but it included additional characteristics of several nano-objects.

Статья поступила в редакцию 22.06.2011.